

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

А. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ¹, П. А. ВЫДМЫШ², М. В. АГЕЕВА³

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7.
E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²ООО «Метинвест-Промсервис». 87500, г. Мариуполь, Никопольский просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com

³Донбасская государственная машиностроительная академия. 84313, г. Краматорск, ул. Академическая, 72.
E-mail: maryna_ah@ukr.net

Показано, что в настоящее время имеются расчетные методики, позволяющие определить индукцию в зоне сварочной ванны, которую генерируют двухстержневые устройства ввода поперечного магнитного поля при дуговой сварке. Однако эти методики чрезвычайно сложны в использовании. В настоящей работе предложена расчетная методика определения численных значений компонент индукции поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны. Методика основана на использовании экспериментальных данных о величине индукции, генерируемой устройством ввода поперечного магнитного поля в зоне сварочной ванны при различной величине сечений стержней этих устройств ввода. Предложены расчетные выражения и алгоритм их использования для определения компонент индукции магнитного поля в указанной зоне. Показана удовлетворительная сходимость расчетных данных с экспериментальными. Методика рекомендуется для использования при дуговой наплавке и сварке изделий из материалов, не являющихся ферромагнетиками. Библиогр. 8, рис. 6.

Ключевые слова: поперечное магнитное поле, индукция, ферромагнетик, сварочная ванна

Воздействие поперечного магнитного поля (ПОМП) при автоматической электродуговой сварке и наплавке под флюсом позволяет управлять гидродинамикой жидкого металла в ванне, геометрией шва (валика), повысить коэффициент расплавления электрода и измельчить структуру шва наплавленного металла [1–4].

В настоящее время нет простых методик для расчета компонент индукции в зоне сварочной ванны, которые генерируют устройства ввода (УВ) ПОМП. Известные расчетные методики, пригодные для этих целей [5–7], характеризуются чрезмерной сложностью. В работе [8] для аналогичных целей предложена также расчетная методика. Однако следует отметить, что эти методики не позволяют получить численные значения индукции под стержнями для различных конструктивных параметров УВ ПОМП. Необходима разработка такой расчетной методики определения компонент индукции, генерируемой УВ ПОМП, которая позволяет учитывать изменение таких параметров, как расстояние между торцами стержней и обмотками, размеры сечения стержней и количество ампервитков (IW) и не отличалась бы чрезмерной сложностью. Разработка такой расчетной методики значительно упростит задачу оптимизации проектируемого УВ ПОМП.

Целью настоящей работы является разработка оценочной методики расчета численных значений компонент индукции, генерируемых УВ ПОМП, в

зоне ванны применительно к дуговой сварке и наплавке, позволяющей быстро и с достаточной для практики точностью определять значения данных параметров.

Для реализации этой цели выполняли следующие исследования. Наиболее простой представляется конструкция устройства УВ ПОМП в виде двух стержней из ферромагнитной стали с обмотками на каждом стержне. На рис. 1 приведены схема устройства УВ ПОМП и конструкция одного из стержней этого устройства. Основные параметры и размеры УВ ПОМП на рис. 1, *a*: a — расстояние между стержнями A и B у их нижних торцов; h — расстояние от торцов стержней до изделия; H — расстояние от катушки до нижнего торца стержня. Ось электродной проволоки совпадает с осью O_1Z_1 . На рис. 1, *б* приведены размеры: b — ширина стержня; c — толщина стержня; L_c — длина стержня; L — высота обмотки; H — расстояние от торца стержня до обмотки. Возможной была регулировка расстояния H от торца стержня до обмотки. Обмотки на стержнях A и B соединяли последовательно таким образом, чтобы нижние торцы стержней A и B имели разные полюса — N и S (рис. 1, *a*).

Для оптимизации УВ ПОМП необходимо установление таких его параметров (по рис. 1, *a*), которые обеспечивали бы максимальный уровень компоненты индукции B_x между стержнями A и B вдоль оси OX при минимальном уровне продольной компоненты индукции B_z .

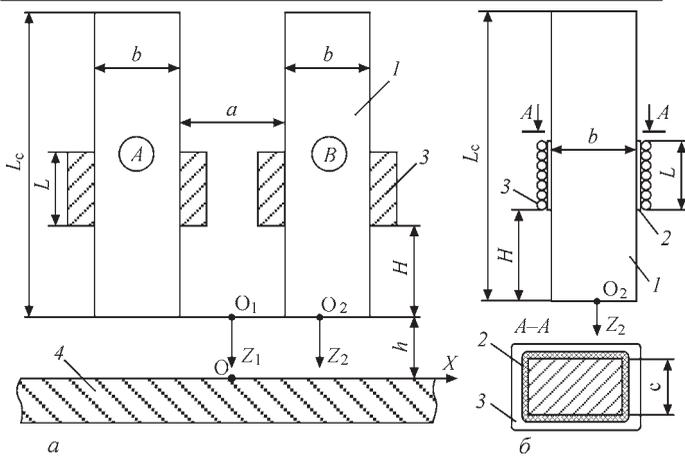


Рис. 1. Устройство ввода ПОМП с двумя стержнями (а) и конструкция стержня с обмоткой (б): 1 — стержень; 2 — изолятор; 3 — обмотка; 4 — изделие

Изготавливали стержни в виде набора из пластин электротехнической стали 1512 (Э42) толщиной 0,5 мм и сечением $F_c = 26 \times 16$ мм, на которых размещали четырехслойные обмотки из медного провода диаметром 1,0 мм высотой $L = 30$ мм с количеством витков $W = 100$. Были изготовлены также стержни сечением 26×8 мм, 26×32 мм, 32×52 мм и, соответственно, с обмотками высотой $L = 30$ мм (эти обмотки могли перемещаться вдоль стержней, чтобы изменять расстояние H). В обмотках пропускали постоянный ток $I_k = 16$ А. Измерения индукции B выполняли универсальным тесламетром типа 43205 с датчиком Холла, имевшим измерительную базу $0,9 \times 0,9$ мм.

Сначала исследовали особенности строения магнитного поля (индукции) для одного стержня. Установлено, что относительные значения индукции $B_z/B_{z\max}$ распределены вдоль оси O_2Z_2 по одной и той же зависимости при изменении H в пределах $H = 0 \dots 60$ мм, т.е. от параметра H значение параметра $B_z/B_{z\max}$ под стержнем практически не зависит. Таким образом, при $H = 0$ обмотка своим полем рассеяния не влияет на результирующее

поле. Генерируемое поле полностью определяется намагниченностью стержня.

Была установлена зависимость $B_z/B_{z\max}$ от расстояния от торца стержня до рассматриваемой точки — z . Следует отметить, что максимальное значение компоненты индукции $B_{z\max}$ наблюдается у торцов стержня УВ ПОМП. Стержни УВ ПОМП обычно имеют прямоугольное сечение. Для упрощения расчетов прямоугольное сечение стержней условно заменено на круглое сечение. При этом вычисляли эквивалентный радиус витка r по формуле $r^2 = F_c/\pi$, который условно располагали в плоскости торца стержня ($z = 0$). Вычисляли значения $B_z/B_{z\max}$ при изменении z (от значения $z = 0$) по формуле:

$$B_z / B_{z\max} = \frac{r^2}{(r^2 + z^2)^n}, \quad (1)$$

где n — показатель степени.

Экспериментальные данные удовлетворительно совпали с расчетными данными, вычисленными по формуле (1), если показатель степени $n = 1$ для всех использованных сечений стержней, т.е. 26×8 мм, 26×16 мм, 26×32 мм и 32×52 мм ($I_k = 16$ А, $H = 35$ мм, $W = 100$).

Относительные значения индукций $B_z/B_{z\max}$ под стержнями (вдоль оси O_2Z_2 по рис. 1, а), полученные путем обработки экспериментальных данных, приведены на рис. 2. Здесь показано, что значения $B_z/B_{z\max}$ практически не зависят от параметра a (кривые 1...4) и близки к значениям (кривая 5), когда расчет выполняется по формуле (1).

Измерением индукции B_z у торцов стержней и изменении расстояния H от торца стержня до обмотки установлено, что при увеличении H индукция B_z уменьшается (при одинаковых значениях $I_k = 16$ А, $W = 100$).

Индукция B_z у торцов стержней подчиняется зависимости

$$\frac{B_{z2\max}}{B_{z1\max}} = \frac{1}{(1 + 0,04H_2^2)}, \quad (2)$$

где H_2 — принятое в расчетах значение размера H , м.

При вычислениях по формуле (2) изначально следует принять значение $H_1 = 0$, при котором наблюдается значение $B_{z1\max}$. Если расстояние H_2 будет отличаться от принятого $H_1 = 0$ (обычно на практике $H_2 > H_1$), то необходимо определить значение $B_{z2\max}$ по формуле (2), подставив в нее значение H_2 . Эти значения $B_{z2\max}$ будут наблюдаться при данных значениях H_2 .

Если изменить значение IW до $I_2W_2 > I_1W_1$ (либо $I_2W_2 < I_1W_1$), то необходимо изменить

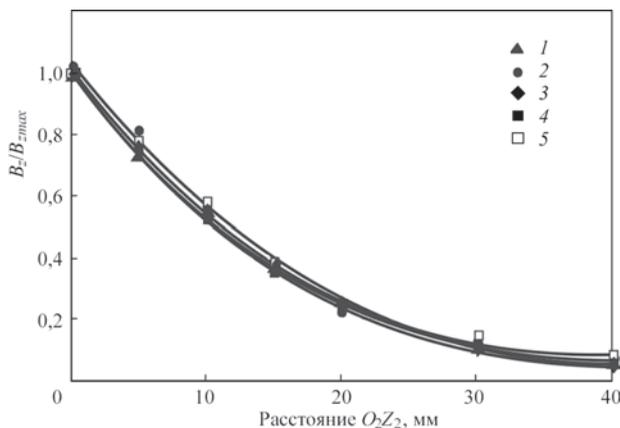


Рис. 2. Распределение значений $B_z/B_{z\max}$ вдоль оси O_2Z_2 в зависимости от параметра a : 1 — $a = 20$ мм; 2 — 40; 3 — 60; 4 — 13; 5 — расчет $B_z/B_{z\max}$ по формуле (1)

$B_{z \max}$ пропорционально изменению IW (увеличить, либо уменьшить), чтобы получить новое значение $B_{z \max}$, соответствующее новому принятому значению IW (изначально принято, что $IW = 1600$).

Экспериментально установлено, что абсолютные значения $B_{x \max}$ в точке O_1 на оси O_1Z_1 (рис. 1, а) зависят от параметра a , как это показано на рис. 2. Следует отметить, что данные о $B_{x \max}$ (в мТл), приведенные на рис. 2, являются исходными для дальнейших расчетов значений B_x в точках на оси O_1Z_1 . Значения $B_{x \max}$ относятся к случаю, когда $IW = 1600$, $H_1 = 0$, а стержни имеют сечение $F_c = 26 \times 16$ мм ($F_c = 416$ мм²). При расчете других абсолютных значений B_x в точке O_1 на оси O_1Z_1 (рис. 1, а) при других значениях F_c , H , IW , которые обозначим через F_{c2} , H_2 , $(IW)_2$, расчет выполняется в порядке, изложенном выше для определения значений индукции B_z в точках на оси O_2Z_2 по формуле (1). Путем обработки экспериментальных данных об индукции B_x установлено, что в пределах $a \leq 20$ мм формула (1) со значением $n = 1,0$ подходит для определения $B_x/B_{x \max}$. Если $a > 20$ мм, то для определения $B_x/B_{x \max}$ необходимо использовать эту формулу, изменив в ней показатели степени n :

- для $a = 40$ мм: $n = 0,8$;
- для $a = 60$ мм: $n = 0,5$.

Для промежуточных значений параметра a в пределах $a = 20 \dots 40$ мм необходимо применять промежуточные значения показателя степени n в знаменателе формулы (1) $n = 1,0 \dots 0,8$, и аналогично для $a = 40 \dots 60$ мм: $n = 0,8 \dots 0,5$. Для удобства их использования при расчетах приведем дополнительно и численные их значения в точке O_1 на оси O_1Z_1 для $IW = 1600$:

- $a = 13$ мм: $B_{x \max} = 121$ мТл;
- $a = 20$ мм: $B_{x \max} = 99,9$ мТл;
- $a = 40$ мм: $B_{x \max} = 37,6$ мТл;
- $a = 60$ мм: $B_{x \max} = 18,5$ мТл.

Проверка показала, что по разработанной методике возможно определить численные значения компонент индукций B_z и B_x соответственно вдоль осей O_2Z_2 и O_1Z_1 (см. рис. 1) при различных значениях параметров F_c ; a ; IW ; H . В качестве исходных (как отмечалось) были приняты следующие параметры: $F_c = 26 \times 16$ мм ($F_c = 416$ мм²); $IW = 1600$; $H = 0$. Следует отметить, что у поверхности пластины (сварочной ванны) при расчете компоненты индукции B_x по формуле (1) необходимо принять значение $z = h$ (см. рис. 1, а).

Для реализации предлагаемой методики целесообразно знать значения индукции B_z у торцов стержней УВ ПОМП (и когда катушки размещены вблизи торцов стержней, т. е., когда $H = 0$) в зависимости от сечения стержней и числа ампер-

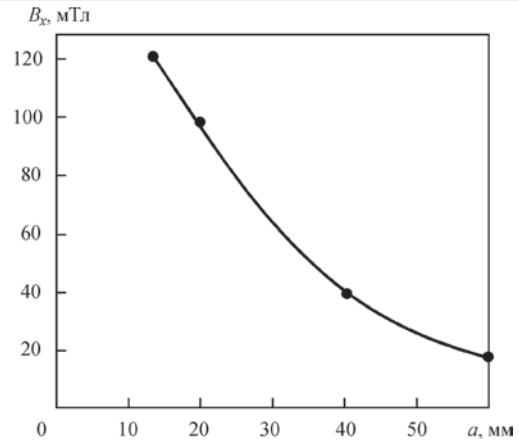


Рис. 3. Зависимость компоненты индукции B_x от параметра a витков размещенных на них обмоток. Для этих целей возможно использовать следующий расчетный метод.

Индукция на продольной оси соленоида длиной L (без ферросердечника внутри его) в точке A , которая расположена у его торца (рис. 4) [6]:

$$B_z = \mu_0 \frac{IW}{2L} \cos \alpha, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; IW — число ампервитков в соленоиде;

$$\cos \alpha = \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}. \quad (4)$$

Здесь R — эквивалентный радиус «окна» катушки (соленоида):

$$R = \sqrt{\frac{F_c}{\pi}}, \quad (5)$$

где F_c — сечение стержня.

На рис. 5 приведены расчетные значения (кривая 2) индукции B_z у торцов катушек, освобожденных от стержней различного сечения (F_c). Расчетные и экспериментальные (кривая 1) значения B_z близки и не зависят от величины сечения «окна» катушек и могут быть использованы для расчетов. Экспериментальные значения B_z у торцов стержней (с катушками, когда $H = 0$) значительно больше, чем у катушек (соленоидов) без стержней (кривая 3 на рис. 5) и при увеличении F_c линейно уменьшаются по зависимости (для $IW = 1600$):

$$B_z = 90 - 2,37(F_c - 2,08). \quad (6)$$

Для расчетов можно использовать коэффициент n , учитывающий наличие ферромагнитного стержня в (соленоиде) катушке:

$$n = \frac{B_{z \max}}{B_z}, \quad (7)$$

где $B_{z \max}$ — индукция у торца стержня, мТл.

Коэффициент n линейно уменьшается при увеличении сечения стержня F_c . Эта зависимость соответствует формуле (рис. 6):

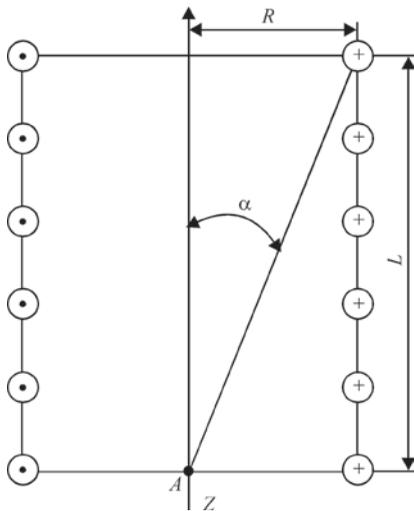


Рис. 4. Схема к расчету индукции B_z в точке A на оси Z : R — радиус витков соленоида; L — длина соленоида

$$n = 3,75 - 0,0912(F_c - 2,08). \quad (8)$$

Значения коэффициента n не изменились для стержней из набора листов электротехнической стали 1512 (Э42) и сплошного сечения из сталей ВМСтЗсп и 09Г2С (при равной намагничивающей силе обмоток IW). Значения коэффициента n не изменились также при пропускании в катушках постоянного, либо переменного тока частотой 50 Гц и при изменении таких параметров в пределах: ампервитков 800...3200; размера $H = 0...70$ мм; размера $h = 15...50$ мм.

Разработанная расчетная методика определения компонент индукции может быть рекомендована не только для оптимизации конструкции УВ ПОМП, состоящей из стержней прямоугольного сечения, но и для стержней цилиндрической формы. Следует также отметить, что разработанная расчетная методика определения значений компонент индукции B_x , B_z значительно ускоряет определение оптимальных размеров элементов конструкции УВ ПОМП (размеров стержней в сечении, расстояния между стержнями). Методика относится к варианту, когда основной металл (пластина) не является ферромагнетиком. Предлагаемый метод позволяет определить численные значения индукции B_x в точках на оси O_1Z_1 и индукции B_z в точках на оси O_2Z_2 .

Расчеты индукций целесообразно выполнять в такой последовательности. Сначала использовать формулы (3)–(5) и рис. 4 и затем — формулы (7), (8). После этого учитываются реальные значения H и h и выполняются расчеты численных значений индукций B_x в точках на оси O_1Z_1 и индукции B_z в точках на оси O_2Z_2 , используя формулы (1) и (2), и что у поверхности изделия — пластины $z = h$.

Характер изменения относительных значений компонент индукций $B_x/B_{x\max}$ и $B_z/B_{z\max}$ вдоль оси OX (рис. 1, а) соответствует установленному ранее в работе [8]. Используя данные этой работы

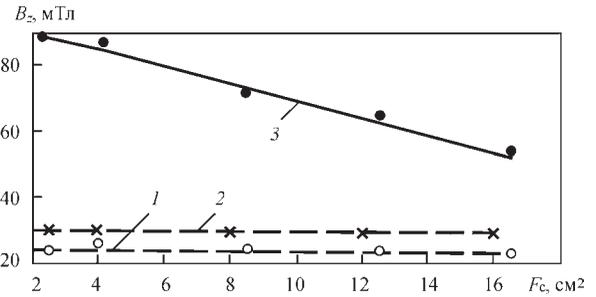


Рис. 5. Зависимость индукции B_z от сечения стержней F_c ($IW = 1600$): 1, 2 — соленоид без ферросердечника; 1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные данные; 3 — соленоид с ферросердечником, экспериментальные данные

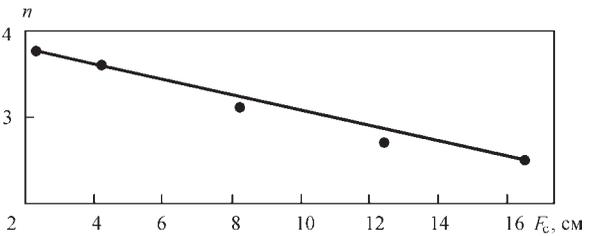


Рис. 6. Зависимость коэффициента n от сечения стержня F_c

о характере изменения этих относительных значений компонент индукций вдоль оси OX можно по предлагаемой методике определить численные значения компонент индукции в любой точке поверхности сварочной ванны и в зоне электродной капли при дуговой сварке и наплавке. Если в конструкции УВ ПОМП стержни соединены сверху перемычкой (из того же материала и такого же поперечного сечения, что и стержни), то получаемые в расчетах значения компонент индукции B_x и B_z следует увеличить на 20...25 %.

Выводы

1. Разработанные на основе обработки экспериментальных данных расчетные выражения для определения индукции, генерируемой УВ ПОМП, в зоне сварочной ванны обеспечивают удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными.

2. Расчетная методика позволяет определить абсолютные значения индукции в зоне под торцами стержней УВ ПОМП, если известны размеры их сечений, либо определить их оптимальные размеры для достижения максимальных значений поперечной компоненты индукции при минимальных значениях продольной компоненты индукции в зоне сварочной ванны.

Список литературы

1. Скиперский Н. А., Рыбачук А. М. (2000) Формирование шва поперечным магнитным полем при сварке немагнитных материалов. *Сварочное производство*, 7, 53–55.
2. Иофинов П. А., Ибрагимов В. С., Дмитриенко А. К. и др. (1991) Влияние внешнего электромагнитного поля на скорость плавления электродной проволоки при автоматической наплавке под флюсом. *Там же*, 1, 34–35.
3. Размышляев А. Д., Миронова М. В. (2011) Производительность расплавления электродной проволоки при ду-

- говой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля. *Автоматическая сварка*, **5**, 48–51.
4. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (Обзор). *Там же*, **10**, 36–44.
 5. Андреева Е. Г. Шамец С. П., Колмогоров Д. В. (2005) Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, **1**, http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf.
 6. Бессонов Л. А. (2003) *Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле*. Москва, Гардарики.
 7. Тозони О. В. (1975) *Метод вторичных источников в электротехнике*. Москва, Энергия.
 8. Размышляев А. Д., Миронова М. В., Ярмонов С. В., Выдмыш П. А. (2013) Структура поперечного магнитного поля, генерируемого устройствами ввода для процесса дуговой сварки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. пр.*, **26**, сс. 135–141.
 2. Iofinov, P.A., Ibragimov, V.S., Dmitrienko, A.K. et al. (1991) Effect of external electromagnetic field on speed of electrode wire melting in automatic submerged-arc welding. *Ibid.*, **1**, 34-35 [in Russian].
 3. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Kuzmenko, K.G. et al. (2011) Efficiency of melting of electrode wire in submerged-arc surfacing with influence of transverse magnetic field. *The Paton Welding J.*, **5**, 39-42.
 4. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *Ibid.*, 29-35.
 5. Andreeva, E.G., Shamets, S.P., Kolmogorov, D.V. (2005) Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electrical devices using program package ANSYS. *Electron. Sci. J. Oil and Gas Business*, **1**. http://ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf.
 6. Bessonov, L.A. (2003) *Theoretical fundamentals of electrical engineering. Electromagnetic field*. Moscow, Gardariki [in Russian].
 7. Tozoni, O.V. (1975) *Method of secondary sources in electrical engineering*. Moscow, Energiya [in Russian].
 8. Razmyshlyayev, A.D., Mironova, M.V., Yarmonov, S.V., Vydмыш, P.A. (2013) Structure of transverse magnetic field generated by input devices for arc welding processes. *Visnyk Pryazov. DTU: Transact. Mariupol*, **26**, 135-141 [in Russian].

References

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКЦІЇ КЕРУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЗОНІ ВАННИ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

О. Д. РАЗМЫШЛЯЕВ¹, П. О. ВИДМИШ², М. В. АГЕСВА³

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²ТОВ «Метінвест-Промсервіс». 87500, м. Маріуполь, Нікопольський просп., 113-а. E-mail: pstukmu@gmail.com

³Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72. E-mail: maryna_ah@ukr.net

Показано, що в даний час є розрахункові методики, що дозволяють визначити індукцію в зоні зварювальної ванни, яку генерують двострижневі пристрої введення поперечного магнітного поля при дуговому зварюванні. Однак ці методики надзвичайно складні у використанні. У даній роботі запропонована розрахункова методика визначення чисельних значень компонент індукції поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни. Методика заснована на використанні експериментальних даних про величину індукції, що генерується пристроєм введення поперечного магнітного поля в зоні зварювальної ванни при різній величині перетинів стрижнів цих пристроїв введення. Запропоновано розрахункові вирази і алгоритм їх використання для визначення компонент індукції магнітного поля у зазначеній зоні. Показана задовільна збіжність розрахункових даних з експериментальними. Методика рекомендується для використання при дуговому наплавленні і зварюванні виробів з матеріалів, які не є ферромагнетиками. Бібліогр. 8, рис. 6.

Ключові слова: поперечне магнітне поле, індукція, ферромагнетик, зварювальна ванна

METHODOLOGY OF DETERMINATION OF INDUCTION OF CONTROLLED MAGNETIC FIELD IN POOL ZONE DURING ARC WELDING

A.D. RAZMYSHLYAEV¹, P.A. VYDMYSH², M.V. AHIEIEVA³

¹State Higher Education Institute Pryazovskyi State Technical University 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, Ukraine. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²OJSC «Metinvest-Promservis», 113-a Nikopol ave., 87500, Mariupol, Ukraine, E-mail: pstukmu@gmail.com

³Donbass State Machine Building Academy, 72, Akademicheskaya str., 84313, Kramatorsk, Ukraine. E-mail: maryna_ah@ukr.net

It is shown that at the present time the calculation methods, which allow determining induction in the weld pool zone, which is generated by two-rod devices for input of transverse magnetic field during arc welding. However, these methods are extremely difficult to use. In this paper, the calculation methods for determining numerical values of the induction components of a transverse magnetic field in the weld pool were proposed. The methods are based on the use of experimental data on the value of the induction generated by the transverse magnetic field input device in the weld pool zone at different value of rod cross-sections of these input devices. The calculation expressions and an algorithm for their use are proposed to determine the magnetic field induction components in the indicated zone. The satisfactory convergence of the calculated data with the experimental ones is shown. The methods are recommended for using in arc surfacing and welding of products of materials which are not ferromagnetics. 8 Ref., 6 Fig.

Keywords: transverse magnetic field, induction, ferromagnetic, welding pool

Поступила в редакцію 12.06.2018